NDAF 的中微子湮灭模型解释 GRB 090510 的爆发

林一清* 程再军

（厦门理工学院 福建省光电器件与技术重点实验室 厦门 福建 361024）

摘要：围绕着恒星级黑洞的中微子主导吸积盘可以通过盘上发出的中微子湮灭为伽玛暴提供能量。对于黑洞超吸积系统，吸积可能引起黑洞特征的极大演化，而这会进一步引起中微子光度的演化。考虑不一样的平均吸积率和初始黑洞参数，通过吸积系统的演化分析中微子湮灭光度和总的中微子湮灭能量随时间的变化。同时计算了短暴 GRB 090510 的中微子湮灭能量并且与理论预测的结果比对，发现 NDAF 的中微子湮灭能量的理论预测值远高于观测值，意味着这种模型可能可以提供 GRB 090510 爆发所需要的能量。

关键词：吸积；吸积盘；黑洞；伽玛暴

中图分类号：P172.3　　**文献标识码：**A　　文章编号：1672-7673（2018）

伽玛射线暴（Gamma-Ray Bursts，GRBs）是来自宇宙空间的伽玛射线在短时间内忽然增强的高能爆发现象。它的持续时间一般在 0.1s 到 1000s 之间，通常用 T_{90}（T_{90} 指光子数累积计数从 5%到 95%）作为典型时标，把伽玛射线暴分为长暴(T_{90}>2s)和短暴(T_{90}<2s)两种类型。两类暴可能产生于不同的辐射区域，它们的暴源可能有本质的区别[1]。目前普遍认为长暴起源于大质量恒星的引力塌缩，短暴来源于双中子星或者中子星与黑洞双星系统的并合。引力塌缩或者双星并合都可能形成一个以恒星级黑洞为中心，周围是一个吸积盘的超吸积系统[2]。在吸积系统中，通常可以认为是中微子湮灭过程为伽玛暴提供能量，而一个围绕着恒星级黑洞的具有非常高的吸积率的中微子主导吸积盘（Neutrino Dominated Accretion Flow, NDAF）被认为是伽玛暴中心能源机制的重要候

*基金项目：国家自然科学基金（61504113）资助.
收稿日期：2018-01-11；修订日期：2018-02-07
作者简介：林一清，女，教授. 研究方向：天体物理.　Email：yqlin@xmut.edu.cn

选者[3-4]。中微子主导吸积盘的内区吸积物质具有非常高的密度和温度，质子和光子无法从盘上逃逸。相反，中微子可以带着粘滞产生的热量和大量的引力束缚能从盘上辐射，而它们在盘上的湮灭可能产生初始火球。

文[5]推导了通过中微子提供能量的喷流的最大可能能量，该能量是暴持续时间的函数,结果证明了这个模型可以为持续时间小于 100s 的伽玛暴提供能量，而晚期的 X 射线耀发和超长伽玛暴很难用这个模型解释。但是，他们忽略了来自于中心机制的活动，以及黑洞的演化，特别是黑洞转速的演化。在中微子主导吸积盘中，中微子辐射和中微子湮灭光度与吸积率、黑洞质量以及黑洞转速紧密相关[6]。如果在伽玛暴的中心，真的存在一个围绕着中微子主导吸积盘的恒星级黑洞，那么在这种黑洞超吸积系统中，吸积可能引起黑洞的剧烈演化，黑洞参数不可避免地发生巨大变化，而这将进一步影响中微子湮灭光度以及总的中微子能量[6]。首先讨论不同的初始参数下转速的演化，肯定了黑洞的演化引起黑洞参数的巨大变化。接着讨论不同参数下中微子光度和总的中微子能量的演化，分析黑洞参数对中微子光度和能量的影响。最后根据短暴 GRB 090510 的观测数据计算 GRB 090510 的中微子能量，并与理论预测值进行比较，分析这种机制解释短暴 GRB 090510 爆发的可行性。

1、物理模型分析

理论上，如果在伽玛暴的中心存在一个超吸积系统，那么黑洞的特征参数将随着时间发生很大的变化。不考虑 BZ 机制，根据能量和角动量守恒公式，可以得到一个 Kerr 黑洞的演化方程[6]：

$$\frac{dM_{BH}}{\mathrm{dt}} = \dot{\mathrm{M}} e_{ms}, \qquad (1)$$

$$\frac{dJ_{BH}}{\mathrm{dt}} = \dot{\mathrm{M}} l_{ms}, \qquad (2)$$

其中 M_{BH}， J_{BH} 和 $\dot{M}$ 分别是黑洞的质量、角动量和平均吸积率。下面用无量纲化的参数 $m_{BH} = M_{BH} / M_{\odot}$ 和 $\dot{m} = \dot{M} / (M_{\odot} s^{-1})$ 计算。e_{ms} 和 l_{ms} 对应于最大稳定半径 r_{ms} 处的能量和角动量，可以写成如下形式：

$$e_{ms} = \frac{1}{\sqrt{3\chi_{ms}}}(4 - \frac{3a_*}{\sqrt{\chi_{ms}}}), \qquad (3)$$

$$l_{ms}=2\sqrt{3}\frac{GM_{BH}}{c}(1-\frac{2a_*}{3\sqrt{\chi_{ms}}}),\qquad（4）$$

其中，$a^*\equiv cJ_{BH}/GM_{BH}^2$ 为黑洞的无量纲转速，$\chi_{ms}=3+Z_2-\sqrt{(3-Z_1)(3+Z_1+2Z_2)}$ 为无量纲化盘的最大稳定轨道半径。其中，$Z_1=1+(1-a^2)^{1/3}[(1+a)^{1/3}+(1-a)^{1/3}],Z_2=\sqrt{3a^2+Z_1^2}$。

根据（1）-（4）式可以得到黑洞转速随时间的演化：

$$\frac{da}{dt}=2\sqrt{3}\frac{\dot{M}}{M_{BH}}(1-\frac{a}{\sqrt{\chi_{ms}}})^2 .\qquad（5）$$

如果黑洞初始的质量 m_i、转速 a_i 和吸积率 $\dot{m}$ 给定，那么根据方程可以得到任意时刻黑洞的特征参数。而吸积率 $\dot{m}$ 的给定，则需要考虑吸积率和盘质量之间的关系，盘质量可以根据下式估算：

$$M_{disk}=\dot{M}\frac{T_{90}}{1+z},\qquad（6）$$

其中，T_{90} 和 z 分别是暴的持续时间和红移。为了简单方便，用无量纲化的参数 $m_{\rm disk}=M_{\rm disk}/M_{\odot}$ 计算。

在中微子主导吸积盘模型中，由于中微子湮灭光度 $L_{\nu\bar{\nu}}$ 与黑洞质量 M_{BH}、黑洞转速 a 和吸积率 $\dot{m}$ 有密切的关系，所以黑洞质量和角动量的剧烈演化也会引起中微子光度的演化。中微子光度的理论分析表达式[6]：

$$L_{\nu\bar{\nu}}\approx1.59\times10^{54}\chi_{ms}^{-4.8}m_{BH}^{-3/2}\dot{m}^{9/4}erg\cdot s^{-1},\qquad(7)$$

对（7）式积分，可以得到中微子总的湮灭能量：

$$E_{\nu\bar{\nu}}\approx1.59\times10^{54}\int_0^{T_{90,s}/(1+z)}\chi_{ms}^{-4.8}m_{BH}^{-3/2}\dot{m}^{9/4}dt_s\,erg,\qquad（8）$$

其中，$T_{90,s}=T_{90}/(1s)$，$t_s=t/(1s)$。

观测上，触发伽玛暴瞬时辐射和余辉的火球能量主要由中微子和反中微子湮灭提供，因此，中微子湮灭总能量 $E_{\nu\bar{\nu}}$ 等于根据瞬时辐射阶段的观测数据得到的各向同性辐射能量 $E_{\gamma,iso}$ 和长时标余辉能量外流的各向同性动能 $E_{K,iso}$ 之和[7,8]。

$$E_{\nu\bar{\nu}}\approx\frac{(E_{\gamma,iso}+E_{k,iso})\theta_j^2}{\eta},\qquad（9）$$

其中，η 为转化效率；θ_j 为喷流的张角。选取 $\eta=0.3$，可以从观测数据计算出中微子总的湮灭能量。

2 结果和分析

根据上面的方程，可以通过合理地给定黑洞的初始质量m_i、转速a_i和吸积率$\dot{m}$，得到中微子湮灭光度和总的中微子湮灭能量随时间的变化。

参数选择的合理性是一个至关重要的问题，而盘质量是反应这种模型合理性的一个重要因素。短暴来源于致密双星的并合，因此，黑洞的质量通常小于双星的总质量，即：$< 4M_{\odot}$，双中子星或者黑洞与中子星双星并合的模拟结果表明，盘质量大约在$0.2M_{\odot}$到$0.5M_{\odot}$之间[3,8]。可以合理地假设黑洞初始质量$m_i = 2.3和3$, 盘质量$m_{\rm disk} = 0.2和0.5$, 选取黑洞转速$a_i = 0、0.5和0.9$。根据（1）式到（5）式得到转速 a 随时间变化的关系曲线，

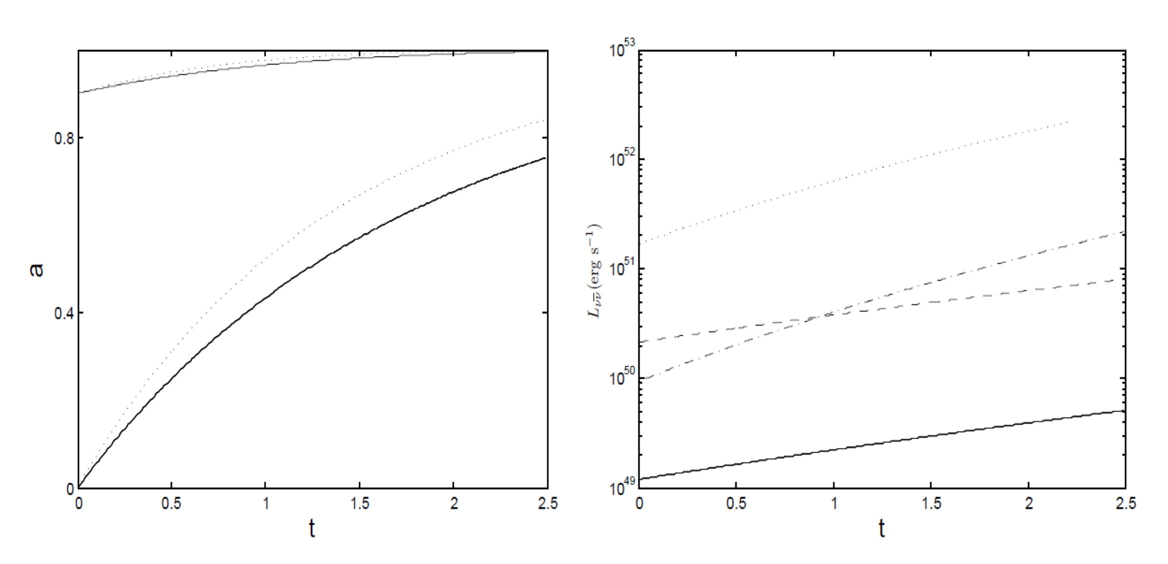


图 1(左) 黑洞转速 a 的演化。实线和虚线分别表示初始黑洞质量为 2.3 和 3.

图 2（右）中微子湮灭光度$L_{\nu\bar{\nu}}$的演化。所有线的初始黑洞质量取 2.3. 实线和虚线分别表示吸积率为 0.2，初始转速为 0.5 和 0.9.虚点线和点线分别表示吸积率为 0.5， 初始转速为 0.5 和 0.9.

Fig.1(Left) Evolution of the spin of BH a. Solid and dashed lines correspond to the initial dimensionless value of BH mass 2.3 and 3, respectively。

Fig. 2（Right） Evolution of the mean neutrino annihilation luminosity $L_{\nu\bar{\nu}}$. All lines correspond to the initial dimensionless value of BH mass 2.3。The solid and dashed lines correspond to the dimensionless mean accretion rate 0.2 and the initial spin of 0.5 and 0.9, respectively. The dashed dotted and dotted lines correspond to the dimensionless mean accretion rate 0.5 and the initial spin of 0.5 and 0.9, respectively.

如图 1。图 1 中，初始转速分别取 0 和 0.9，实线和虚线分别表示初始黑洞质量为 2.3 和 3。 从图中可以清楚地看到黑洞转速随时间的演化有比较明显的变化。而黑洞的转速对吸积盘质量的影响尤为重要，因此在计算中必须考虑转速的演化。从图中也可以看出黑洞初始质量对转速的演化影响比较小，所以后面的计算中，统一选取黑洞的初始质量为 2.3。接着根据（7）式计算中微子湮灭光度的演化，如图 2，图中实线和虚线分别表示吸积率为 0.2，初始转速为 0.5 和 0.9 的情况，虚点线和点线分别表示吸积率为 0.5，初始转速为 0.5 和 0.9 的情况。从中可以看到中微子光度随着时间的演化变化很大，它的最大值可以达到 10^{52}erg s^{-1}。

中微子湮灭光度的计算与观测数据不具有直接的相关性。为了进一步检验中微子湮灭模型的合理性，选择短暴 GRB 090510 的观测数据[7]，如表 1，计算了短暴 090510 的中微子湮灭总能量 $E_{\nu\bar{\nu}}$，并且与理论计算分析线比较，如图 3。根据（6）式，选取 GRB 090510 的 T_{90} 和 z，当 $m_{\rm disk}=0.2$ 时，吸积率为 1.27。3 条线对应的参数分别是虚线：吸积率 1.27，初始转速 0.9；实线：吸积率 1.27，初始转速 0.5；虚点线：吸积率 0.2，初始转速 0.5。星星表示根据 GRB 090510 的观测数据由（9）式计算出来的的 $E_{\nu\bar{\nu}}$，发现 GRB 090510 的中微子湮灭总能量的观测值远小于理论预测值，而且初始转速或盘质量取更大值时，吸积率也将更大，这时 $E_{\nu\bar{\nu}}$ 的理论预测值更大。

表 1 GRB 090510 的观测数据

Table 1 Observational data of GRB 090510.

GRB	**T_{90}** (s)	**Z**	**F_γ** (10^{-7}erg cm^{-2})	**Fx(11 hours)** (10^{-14}erg cm^{-2} s^{-1})	**$E_{\gamma,iso}$** (10^{51}ergs)	**$E_{k,iso}$** (10^{51}ergs)	**θ_j** (rad)	$E_{\nu\bar{\nu}}$ (10^{48}ergs)	Ref
090510	0.3	0.903	3.4	5.04	0.73	2.15	0.017	0.028	(7)

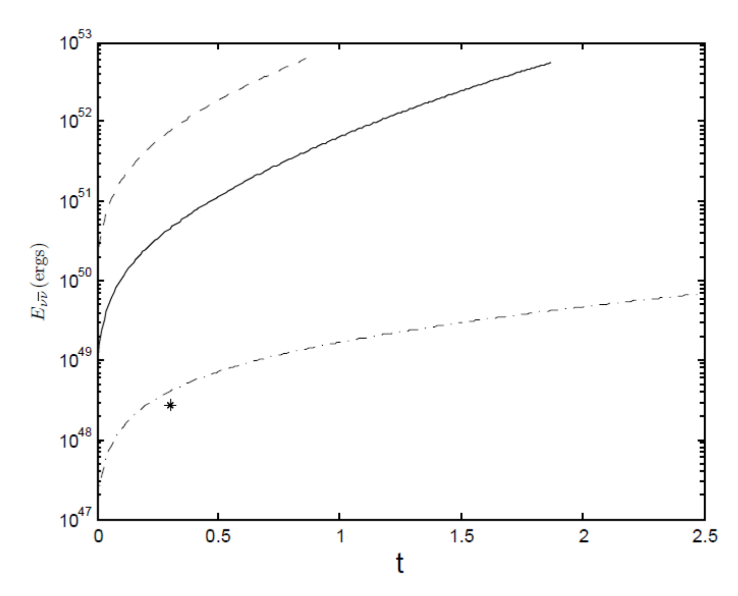


图 3：中微子总能量理论预测值和观测值的比较。3 条线黑洞初始质量都为 2.3，虚点线表示吸积率为 0.2，初始转速为 0.5；实线和虚线都是吸积率为 1.27，初始转速分别为 0.5 和 0.9，线终止的位置为转速大于 0.998 的位置，星星表示 GRB 090510 的观测值。

Fig.3 Comparison of the theoretical predictions and observational date of the total annihilation energy. Three lines all correspond to the initial dimensionless value of BH mass 2.3。The dash dot line correspond to the dimensionless mean accretion rate 0.2 and the initial spin of 0.5; the solid and dashed lines correspond to the dimensionless mean accretion rate 1.27 and the initial spin of 0.5 and 0.9, respectively. The lines truncate when the BH spin has evolved to 0.998. The star denote the observational result of GRB 090510.

3 结论和讨论

短暴最有可能起源于双致密星并合，因为这种情形产生的吸积盘较小，持续时间可以和暴的持续时标相当，而围绕着恒星级黑洞的中微子主导吸积盘可以通过盘上发出的中微子湮灭为伽玛暴提供能量。对于这样一个黑洞超吸积系统，盘质量是反应这种模型合理性的一个重要因素，根据短暴的数据，在火球和中微子湮灭模型的框架下，用黑洞的不同参数估算了吸积盘的质量，发现短暴吸积盘的质量主要依赖于输出能量、喷流的张角和黑洞的参数。而黑洞参数中，黑洞的转速和吸积率对盘质量的影响尤为重要[7]。

选取不同的初始黑洞转速和平均吸积率，可以明显地看到转速随时间的变化很大，即：吸积可能引起黑洞特征的极大演化，而这会进一步引起中微子光度的演变。进一步讨论了不同吸积率，给定不同的黑洞初始参数的情况下，平均中微子湮灭光度的含时演化以及总的中微子湮灭光度的演化。为进一步讨论这种模型解释伽玛暴瞬时辐射和余辉阶段的可能性，选取了短暴 GRB 090510 的观测数据，通过观测数据计算了伽玛暴观测

的中微子湮灭总光度，并且和上面的理论预测结果相比较发现，GRB 090510 的中微子湮灭总光度在理论预测线下方，远小于理论预测值，这可能意味着这个理论模型可以提供 GRB 090510 爆发所需要的能量。

致谢　感谢.

1、彭朝阳，覃一平. 两类γ暴的谱形和光变曲线的统计差异[J]. 天文研究与技术——国家天文台台刊，2004，1（2）：77-83.
Peng Zhaoyang, Qin Yiping. Statistical distinctions of the spectra and light curves between two classes of gamma-ray bursts[J]. Astronomical Research & Technology—Publications of National Astronomical Observatories of China, 2004, 1(2):77-83.

2、Woosley S E. Gamma-ray bursts from stellar mass accretion disks around black holes[J]. The Astrophysical Journal, 1993, 405(1): 273-277.

3、Liu T, Hou S J, Xue L, et al. Jet luminosity of gamma-ray bursts: the Blandford-Znajek mechanism versus the neutrino annihilation process[J]. The Astrophysical Journal Supplement Series, 2015, 218: 12(7pp).

4、Popham R, Woosley S E, Fryer C. Hyperaccreting black holes and gamma-ray bursts[J]. The Astrophysical Journal, 1999, 518(1): 356-374.

5、Leng M B, Giannios D. Testing the neutrino annihilation model for launching GRB jets[J]. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 2014, 445(1): L1-L5.

6、Song C Y, Liu T, Gu W M, et al. Evolution of stellar-mass black hole hyperaccretion systems in the center of gamma-ray bursts[J]. The Astrophysical Journal, 2015, 815:54-59.

7、Liu T, Lin Y Q, Hou S J, et al. Can black-holes neutrino-cooled disks power short gamma-ray?[J]. The Astrophysical Journal, 2015, 806:58(7pp).

8、Fan Y Z, Wei D M. Short gamma-ray bursts: the mass of the accretion disk and the initial radius of the outflow[J]. The Astrophysical Journal, 2011, 739:47(7pp) .

The neutrino annihilation model of NDAF explains the explosion of GRB 090510

Lin Yi Qing*　Cheng Zai Jun

(Fujian Provincial Key Laboratory of Optoelectronic Technology, Xiamen University of Technology, Xiamen,
Fujian 361005, China;)

Abstract　A neutrino-dominated accretion disk around a stellar-mass black hole can power a gamma-ray burst via annihilation of neutrinos launched from the disk. For the black hole hyperaccretion system, accretion should trigger the violent evolution of the black hole’s characteristics, which further leads to the evolution of the neutrino annihilation luminosity. In this paper, we analyze the mean time-dependent

neutrino annihilation luminosity and the total neutrino annihilation energy via the evolution of the accretion system by setting the different mean accretion rates and initial black hole parameter. Furthermore, we calculate the total neutrino annihilation energy of the short GRB 090510 by observational data, and compare with the results of theoretical analysis. It is found that the theoretical valre of the annihilation energy of NDAF neutrinos is much higher than that of the observed values, which means that the mechanism may can explain the explosion of the short GRB 090510.

Key word: accretion, accretion disks, black holes, gamma-ray bursts